

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

TRENDY V OBLASTI NUMERICKÝCH SIMULACÍ SLÉVÁRENSKÝCH PROCESŮ

DEVELOPMENTS IN NUMERICAL SIMULATION OF FOUNDRY PROCESSES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAKUB HALUZA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. VLADIMÍR KRUTIŠ, Ph.D.

BRNO 2010

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2009/2010

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jakub Haluza

kteřý/kteřá studuje v bakalářském studijním programu

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a
zkusobním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Trendy v oblasti numerických simulací slévárenských procesů

v anglickém jazyce:

Developments in numerical simulation of foundry processes

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Numerická simulace se s vývojem hardware and software stala již neoddělitelnou součástí návrhu a optimalizace slévárenské technologie. Dokáže stále přesněji popisovat jednotlivé děje a přesněji predikovat vznik slévárenských vad. Vývoj v oblasti jednotlivých kritérií predikce vad jde neustále kupředu a tudíž práce bude mapovat jednotlivé směry vývoje.

Cíle bakalářské práce:

Zpracování přehledu vývoje a trendů v oblasti numerické simulace slévárenských procesů se zaměřením na nově simulované technologie, materiály a nové metodiky přípravy výpočtových sítí.

Seznam odborné literatury:

1. KRUTIŠ, V. Trendy a vývoj v oblasti numerických simulací. Slévárství. Říjen 2004, roč. LII, č. 10, s. 408-410. ISSN 0037-6825.
2. KRUTIŠ, V., aj. Numerické modelování tepelných procesů soustavy nálitek - exoobklad - forma. In Zborník referátov - TECHNOLOGIA 2003. Bratislava: Strojnícka fakulta STU v Bratislave, Slovensko, 2003, s. 57-60. ISBN 80-227-1935-8.
3. BONOLLO, F., and ODORIZZI, S. Numerical Simulation of Foundry Processes. 1st ed. Padova: S.G.E., 2001. 264 p. ISBN 88-86281-63-3.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2009/2010.

V Brně, dne 20.11.2009

L.S.

prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

S rozvojem výpočetní techniky se numerická simulace stala významným pomocníkem při návrhu a optimalizaci slévárenských procesů. Cílem matematického modelování je odladění navrhované technologie ve fázi přípravy výroby, tak abychom se vyhnuli nákladnému experimentálnímu zkoušení. Tato simulace v sobě zahrnuje spojení matematiky, fyziky a výpočetní techniky. Umožňuje nám studovat děje probíhající při proudění taveniny, při tuhnutí a chladnutí odlitků. Zmíněné části simulace jsou živým organismem, který se neustále mění a zdokonaluje. Práce se bude zabývat popisem vývoje, kterým se numerická simulace v posledních letech ubírá.

Klíčová slova

simulace, numerické metody, vady odlitků

ABSTRACT

With the development of the computer equipment the numerical simulation has become a strong tool for the design and optimization of foundry processes. The goal of the modelling is the tuning of the casting technology in pre-manufacturing stage. Numerical simulation allows studying metal flow, solidification and casting cooling. The work will be aimed to new trends and developments in the field of numerical simulation of foundry processes.

Key words

casting simulation, numerical method, casting defect

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

HALUZA, J. *Trendy v oblasti numerických simulací slévárenských procesů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 32 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Vladimír Krutiš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Trendy v oblasti numerických simulací slévárenských procesů vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

27.5.2010

.....
Jakub Haluza

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Vladimíru Krutišovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce a svým rodičům, kteří mě ve studiu podporují.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení	6
Poděkování	7
Obsah	8
1 Úvod	9
2 Fyzikální model základních slévárenských procesů	11
2.1 Přenos hmoty	11
2.2 Přenos energie	12
2.3 Napjatost a deformace	12
3 Matematické metody řešení	13
3.1 Analytické metody	13
3.2 Numerické metody	13
3.2.1 Metoda konečných diferencí	13
3.2.2 Metoda konečných prvků	14
3.2.3 Která z metod je lepší?	16
4 Architektura simulačního software	17
4.1 Databáze	17
4.2 Preprocesoring	17
4.3 Procesoring	17
4.4 Postprocesoring	17
5 Vývojové trendy v oblasti numerických simulací	18
5.1 Numerické metody výpočtu	18
5.2 Zpřesňování popisu celého technologického procesu	19
5.3 Simulace nových technologických procesů	23
5.4 Hardware a software	27
5.5 Zpřesňování vstupních dat	28
6 Závěr	30
Seznam použitých zdrojů	31
Seznam použitých zkratk a symbolů	32

1 ÚVOD

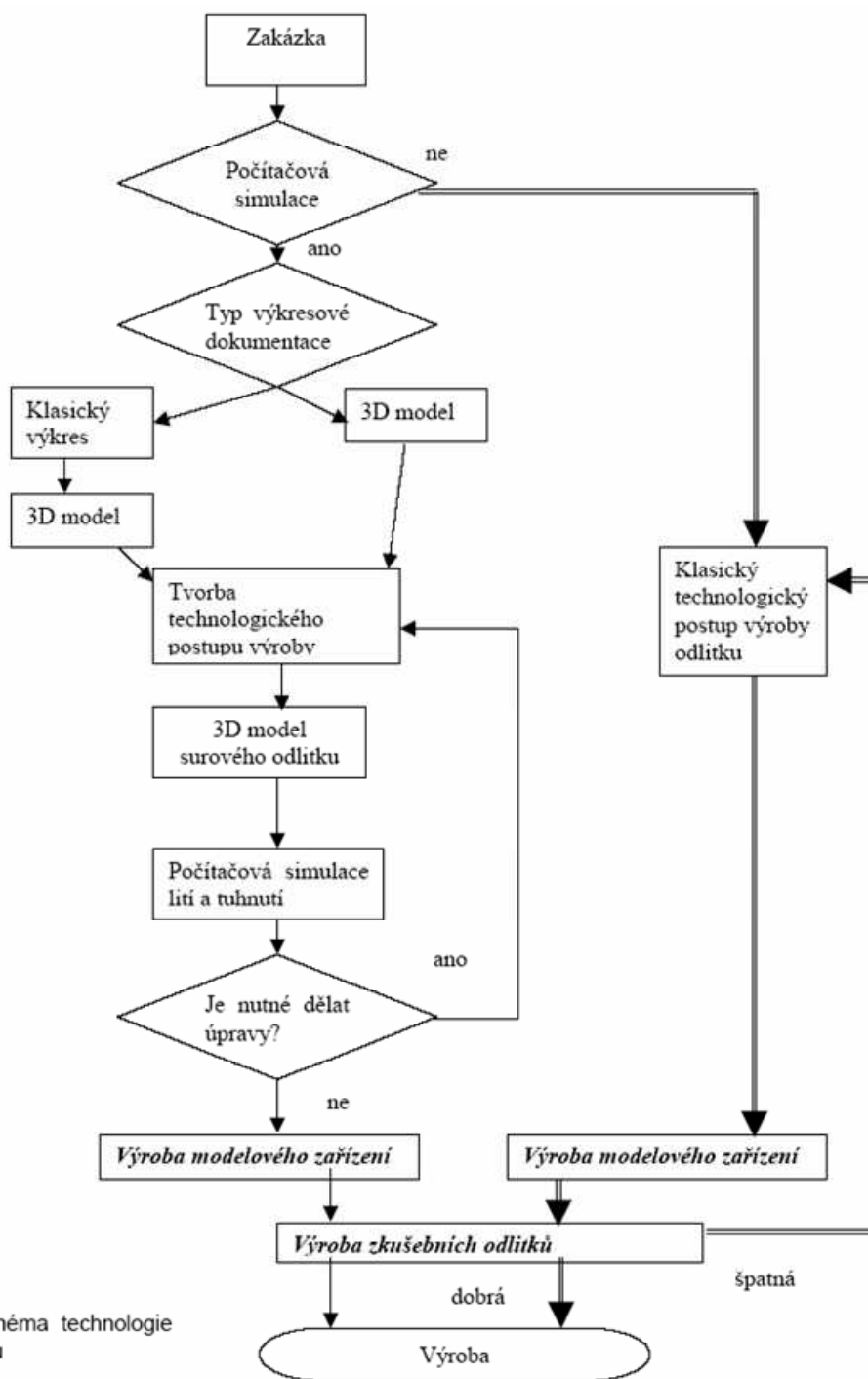
Cílem této práce je zpracování přehledu vývoje a trendů v oblasti numerické simulace slévárenských procesů. Numerická simulace se s vývojem hardware a software stala již neoddělitelnou součástí návrhu a optimalizace slévárenské technologie. Dokáže stále přesněji popisovat jednotlivé děje a přesněji predikovat vznik slévárenských vad. Vývoj v oblasti jednotlivých kritérií predikce vad jde neustále kupředu a tudíž práce bude mapovat jednotlivé směry vývoje.

Počítačová simulace slévárenských technologických a metalurgických procesů v posledních deseti letech velmi pozitivně ovlivnila rozvoj slévárenství. Možnost předcházet technologickým vadám se projevila na výsledné kvalitě odlitků.

Při zavádění nové technologie ve slévárenství se obvykle postupuje metodou pokusů a omylů, kdy je navržena technologie, zhotoven model a odlitek je experimentálně odlit. Poté následuje vyhodnocení jakosti odlitku – rozměrová přesnost, kontrola mechanických vlastností, ale i vady a zbytková pnutí. Následuje zavedení oprav v technologickém postupu, výroba nového modelu a nové odlití. Tento iterační proces, který probíhá prakticky po celou dobu výroby daného odlitku, je velmi nákladný a vyžaduje nemalé úsilí. Počítačová simulace umožňuje odzkoušet navrženou technologii rychleji a levněji, kdy simulujeme dané podmínky a výsledkem je soubor informací a parametrů odlitku. Přehledně je celý proces znázorněn na obr.

Simulaci lze definovat například takto:

Pojmem simulace se rozumí znázornění chování fyzikálního nebo abstraktního systému pomocí určitého modelu, který zjednodušuje prováděnou studii. Obecně lze počítačovou simulaci označit jako vysoce účinný nástroj optimalizace procesů a dějů s využitím vysoce výkonných počítačů [5].



Obr. 2.1 Schéma technologie výroby odlitku

Obr. 1.1 Schéma technologie výroby odlitku (5)

2 FYZIKÁLNÍ MODEL ZÁKLADNÍCH SLÉVÁRENSKÝCH PROCESŮ

Během slévárenských procesů lití, tuhnutí, a chladnutí odlitku probíhají ve formě složité pochody, které nelze pomocí modelu, jaký jsme schopni vytvořit, plně popsat. Při modelování musíme řešit komplikované rovnice mechaniky tekutin a termodynamiky. Tyto rovnice se nazývají bilanční rovnice bilancovatelných veličin. Mezi bilancovatelné veličiny patří [5]:

- hmotnost
- hybnost
- energie(někdy bývá reprezentována termodynamickými veličinami)

2.1 Přenos hmoty

Přenos hmoty se uskutečňuje několika principy – jedná se o přenos prouděním (laminární a turbulentní) v tavenině a v pevné látce, nebo v neproudící kapalině difúzí. Obecně se přenos hmoty řídí zákonem zachování hmoty na vytyčeném, tzv. kontrolním objemu [5].

Vyjádření jednotlivých složek hmotnostní bilance využívá tyto rovnice:

- rovnice kontinuity

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.1)$$

vyjadřuje, že změna hmoty určitého objemu v čase je určena rozdílem mezi množstvím vtékající a vytékající hmoty z kontrolního objemu.

- Fickův druhý zákon difuze

$$\frac{\partial \sigma_i}{\partial \tau} = D \cdot \nabla^2 \cdot \sigma \quad (2.2)$$

tato rovnice je velmi podobná rovnici vedení tepla, což se využívá u zpracování dat.

- Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\vec{F}_m + \vec{F}_p + \vec{F}_t = \vec{F}_s \quad (2.3)$$

Vyjadřuje, že změna hybné síly je spotřebována na změnu rychlosti proudění v daném kontrolním objemu a pokrytí ztrát třením.

Rovnice kontinuity a Navierova-Stokesova pohybová rovnice platí jak pro laminární, tak pro turbulentní proudění. Avšak v druhém případě jsou tyto rovnice neřešitelné v důsledku náhodného - stochastického charakteru turbulentního proudění (dochází k nepravidelným skokovým změnám veličin), což zapříčiňuje úpravu rovnic tak, aby popisovaly časově vyhlazené rozdělení tlaků a rychlostí [5].

2.2 Přenos energie

Přenos energie je velmi komplikovaný proces. U tuhých látek je realizován hlavně sdílením tepla (konvekce, kondukce a radiace tepla). U látek v nepevném stavu (v našem případě tavenina) je ještě realizován navíc pomocí přesunu hmoty. Pro představu je zde uveden výčet tepelných pochodů v soustavě odlitek-forma [5]:

- vedení tepla tekutým kovem
- vedení tepla tuhým kovem
- přestup tepla z taveniny do formy
- přestup tepla z tuhého kovu do formy
- přestup tepla z taveniny do tuhého kovu
- přestup tepla z tuhého kovu do formy přes vzduchovou mezeru
- vedení tepla formou
- sálání tepla vtokovou soustavou a otevřenými nálitky

Základní bilance energie může být vyjádřena rovnicí:

$$dQ_T = d(Q_{\text{difuze}} + Q_{\text{konvekce}} + Q_{\text{zářaře}}) + dQ_{\text{zdroj}} \quad (2.4)$$

Tato bilance vede na poměrně složité diferenciální rovnice přenosu tepla. Pro ilustraci je zde uveden tvar výsledné zjednodušené rovnice vedení tepla, která představuje matematický popis časové změny teploty v libovolném místě tělesa s konstantní tepelnou vodivostí a bez vnitřních tepelných zdrojů [5]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T \quad \text{resp.} \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.5)$$

2.3 Napjatost a deformace

Napjatost v odlitku vzniká jako důsledek vnějšího silového působení, nebo v důsledku tepelné roztažnosti těles. Řešením rovnováhy tělesa, které je na povrchu podrobena silovým účinkům a v objemu tělesa objemovým silám, dojdeme ke vztahům, které vyjadřují složkové a momentové rovnice rovnováhy. Složky napětí lze uspořádat do tenzoru napětí. Vztahy mezi napjatostí a deformací určují chování tělesa při působení sil. Například při zavedení lineárního modelu s malými deformacemi lze použít Hookův zákon. Popřípadě lze požit vztahy pro vyjádření potenciální energie [5].

3 MATEMATICKÉ METODY ŘEŠENÍ

3.1 Analytické metody

Mezi analytické metody patří například metoda separace proměnných, popřípadě Laplaceova a Fourierova transformace. Tyto metody se dají použít v omezené míře na lineární úlohy s jednoduchými okrajovými podmínkami. Řešení je ve tvaru matematického výrazu a pro hledanou proměnnou je funkcí prostorových souřadnic a času. Analytická metoda vyžaduje značné zjednodušení matematického modelu. Proto se tato metoda používá spíše pro kontrolní účely, kde je přesnost výsledků obvykle postačující [5].

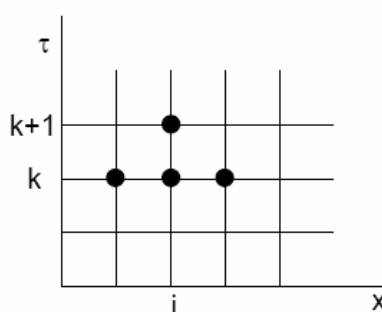
3.2 Numerické metody

Numerické metody nacházejí velké uplatnění v oblasti počítačového modelování. Podstata metod leží v diskretizaci proměnných a v opakovatelnosti jednoduchých algebraických operací určitého typu. Numerické metody nezískávají funkční závislost hledané veličiny, ale umožňují získat řešení úloh v konečném počtu diskrétních bodů. diskrétní body mohou být uzly diferenční sítě, nebo prvky sítě konečných prvků. Přičemž na různé části simulované oblasti lze aplikovat rozdílné metody výpočtu a s tím související síť. Rozsítování povrchu nebo objemu je významnou součástí simulačního procesu. Dále jsou uvedeny některé numerické metody a jejich popis [5].

3.2.1 Metoda konečných diferencí

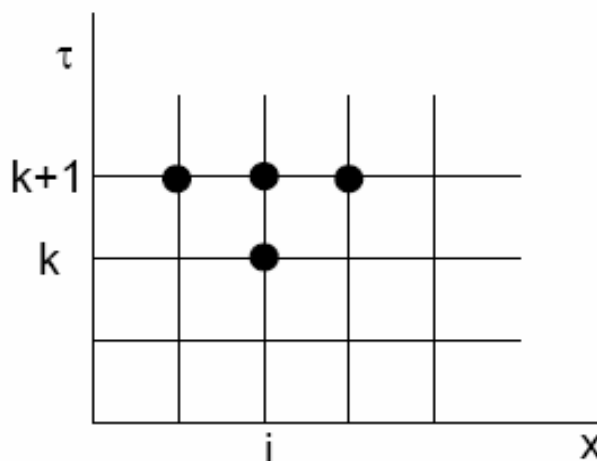
Podstata této metody, která se někdy také nazývá metodou sítí, je nahrazení základní diferenciální rovnice dané proměnné soustavou rovnic diferenčních s použitím okrajových a počátečních podmínek modelu.

Derivaci lze nahradit dopřednou nebo zpětnou diferencí, podle toho rozlišujeme explicitní a implicitní diferenční schéma.



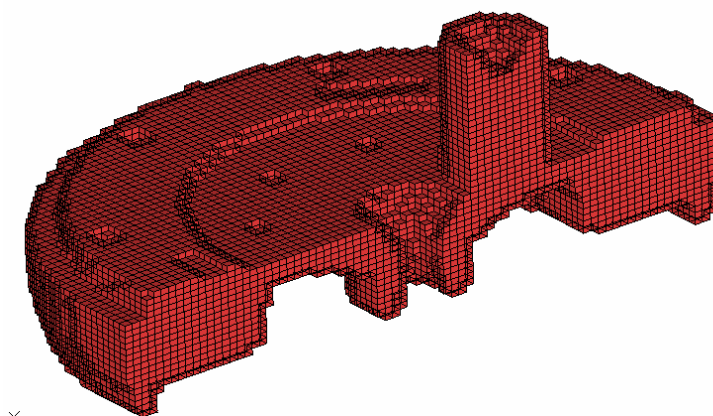
Obr. 3.1 Explicitní diferenční schéma (5)

Výhodou explicitní metody je přímé vyjádření hledané proměnné, avšak ji nelze použít pro libovolnou délku časového a rozměrového kroku. Zmenšujeme-li vzdálenost dvou sousedních uzlů (tedy zjemňujeme-li síť), musí se zmenšit i krok časový.



Obr. 3.2 Implicitní diferenční schéma (5)

U implicitního diferenčního schématu je třeba pro každou časovou hladinu počítat soustavu algebraických rovnic. Nejsme však nijak omezeni velikostí kroku.



Obr. 3.3 Ukázka FDM modelu

Přesnost řešení závisí na hustotě sítě. Zhušťování sítě zvyšuje náročnost výpočtu, avšak lze síť zhušťovat pouze v místech, kde chceme dosáhnout přesnějšího řešení, nebo naopak u tvarově jednoduchých tvarů lze síť zředit [5].

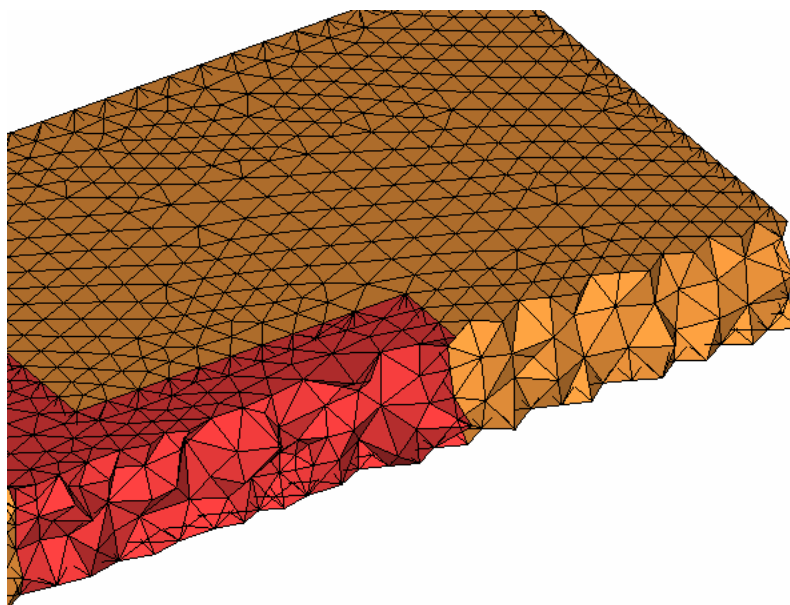
3.2.2 Metoda konečných prvků

Podstata této metody je zcela jiná, než u předešlých metod. Oblast, kde chceme MKP použít rozdělíme na síť prvků konečného počtu – nejčastěji se jedná o trojúhelníky, proto se někdy používá pojem triangulace. Na každém prvku předpokládáme zjišťovanou funkci (teplota, tlak, deformace aj.) jako funkční závislost souřadnic x, y, z a času τ . Řešení na každém prvku má tvar kvadratického

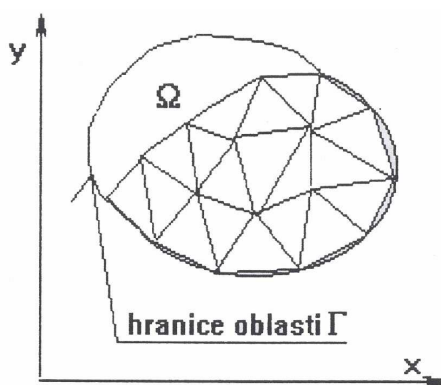
polynomu, nebo lineární funkce, přičemž není zaručena spojitost v uzlových bodech a na hranici prvků. Nespojitosti i vzniklé nepřesnosti vlivem použití lineární funkce lze kompenzovat jemnějším dělení oblasti Ω , v místech, kde předpokládáme kritická místa řešení. Tato aplikace v inženýrské praxi plně postačuje.

Spolu s počátečními a okrajovými podmínkami je nutné potom řešit obecně nelineární soustavy rovnic, neboť jak materiálové charakteristiky, tak i okrajové podmínky mohou být funkcí hledaného řešení.

Okrajové problémy řeší metoda FEM pomocí dvou základních principů. Pomocí variační formule, nebo pomocí minimalizační formulace. Minimalizační formulace je méně obecná než variační [5].



Obr. 3.4 Ukázka FEM modelu



Obr. 3.5 Síť elementů v oblasti Ω

3.2.3 Která z metod je lepší?

Jak FEM tak FDM nalézají své uplatnění při všech simulacích. FDM umožňuje snadné rozdělení do diferenční sítě a má poměrně jednoduchý systém výpočtu. Naopak diferenční síť obtížně kopíruje složité oblé či zkosené tvary, což vede k nutnosti použít síť s větší hustotou uzlů. Tato skutečnost samozřejmě komplikuje výpočet jak z hlediska času tak náročnosti na výpočetní jednotku.

Metoda FEM lépe kopíruje geometrický tvar odlitku a umožňuje lokální zhuštění v problémových místech výpočtu. Metoda je ale náročnější na hardwarové vybavení a čas

Velmi často se obě metody kombinují. Nalezení optimálního použití obou metod je jedním z pilířů dobré simulace [2], [5].

4 ARCHITEKTURA SIMULAČNÍHO SOFTWARE

Architektura jednotlivých software si je velmi podobná. Následuje popis jednotlivých blokových částí.

4.1 Databáze

Obsahuje fyzikální popis materiálů používaný ve slévárenství. Patří sem např. tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, hustota apod. [5].

4.2 Preprocessing

Do této oblasti spadá hlavně definice geometrie modelu odlitku a celé vtokové soustavy, zohledňuje se uložení ve formě. Geometrie modelu je buď importována z jiného CAD systému, nebo je tvořena přímo v simulačním software. Často je model importován a technolog domodeluje úkosy, vtokovou soustavu, nálitky apod. Dále se zde určuje jemnost dělení sítě a provádí samotné rozsítování. V neposlední řadě se definují okrajové podmínky a materiálové charakteristiky, jak materiálu odlitku, tak formy. Dobře zvolené počáteční a okrajové podmínky jsou jedním z nejdůležitějších aspektů správné simulace. vždy se vychází ze stanoveného technologického postupu. Mezi nejdůležitější parametry patří lící teplota, teplota formy, lící výška a správné nadefinování podmínek přestupu a odvodu tepla [5].

4.3 Procesoring

Zde probíhá vlastní výpočet. Dochází k ukládání dat, které jsou pro naše účely podstatné a které si sami nadefinujeme [5].

4.4 Postprocessing

Slouží k vyvolání výsledků simulace, na základě které se vyhodnotí daný postup. Sledují se např. teplotní a tlaková pole v závislosti na čase, plnění formy, až po tvorbu slévárenských vad, fázové přeměny a vnitřní pnutí v odlitku [5].

5 VÝVOJOVÉ TRENDY V OBLASTI NUMERICKÝCH SIMULACÍ

Následující kapitola shrnuje v několika bodech nové možnosti simulace a směry do budoucna.

5.1 Numerické metody výpočtu

Může se zdát, že v oblasti výpočtů se již mnoho nového objevit nedá, neboť pracujeme s fyzikálními modely, jejichž podstata se příliš neliší, avšak opak je pravdou. V současné době je snaha o popsání všech aspektů fyzikálního modelu a tyto zahrnout do výpočtu. Také je snaha o získání co nejkvalitnějších výsledků simulace s přihlédnutím k co nejmenší náročnosti výpočtu.

Už samotná volba metod a jejich správná kombinace může výrazně zkvalitnit výsledky simulace. Proto jsou dnes v softwaru často implementovány postupy pro optimální kombinaci metod vzhledem k tvaru, materiálu a technologii výroby odlitku. Stále máme možnost zadání kritických oblastí na odlitku, které nás zajímají a software sám provede změny sítě a parametrů výpočtu.

Jedním z problémů je také stabilita a konvergence výpočtových metod. Stabilní výpočet poskytne kvalitní výsledky v dobrém čase. Výpočet se může stát nestabilním špatnou volbou podmínek a parametrů, nesprávným užitím atd. Nestabilní výpočet poskytuje nepřesné výsledky a může dokonce zkolabovat. Pro popis stability slouží nespočetná řada kritérií, pomocí kterých můžeme ověřovat stabilitu metod. Stabilitu lze také ovlivnit přímou volbou parametrů. Např. chceme-li u metody FMD zhustit síť uzlů, musíme také patřičně změnit časový krok Δt . Což samozřejmě vede k větší náročnosti výpočtu. Neznalost této skutečnosti může velmi nepříznivě ovlivnit stabilitu [5].

Velká pozornost je také věnována vývoji nových výpočtových metod. Snížením počtu matematických operací během výpočtu se výpočet stává rychlejší a méně náročný na hardware. Jednou z nových výpočtových metod je také CFD – Computational Fluid Dynamics. Umožňuje počítačovou simulaci dějů spojených s prouděním a tepelnými procesy v jednofázových i vícefázových soustavách. Hlavním přínosem počítačových simulací pomocí CFD je úspora jak ekonomická, tak časová. CFD umožňuje modelovat [8]:

- stlačitelnou a nestlačitelnou kapalinu
- laminární a turbulentní proudění
- chemické reakce, chemická interakce s okolním prostředím
- stacionární a nestacionární proudění
- řešení více fázových soustav
- popis izotermických dějů
- paralelní vyšetřování konvekce a kondukce tepla

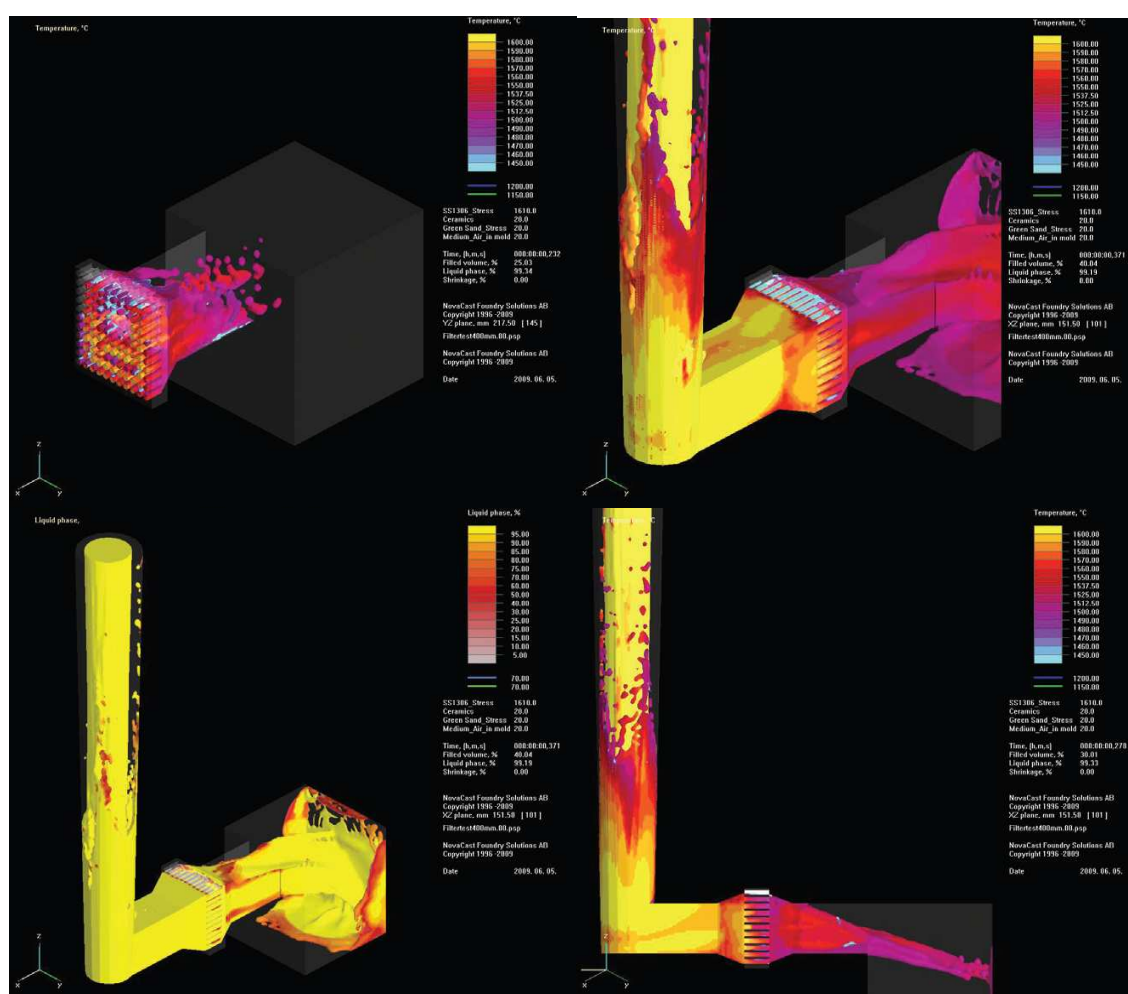
5.2 Zpřesňování popisu celého technologického procesu

Zlepšení v oblasti matematických modelů také umožňuje čím dál přesnější popis skutečného děje při odlévání a tak se do simulace začleňuje čím dál více vlivů, které se v minulosti zjednodušovali.

Filtrace - Jednou z oblastí je také simulace reálných filtrů, kterou nám umožňuje např. program NovaFlow & Solid CV (Control Volume). Použití filtrů při odlévání má několik důvodů:

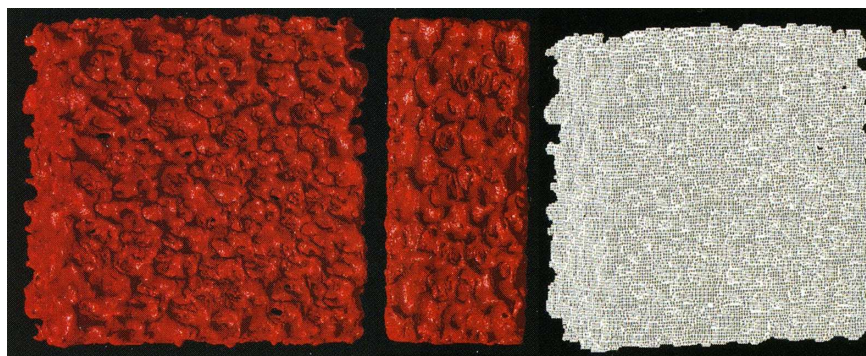
- korekce rychlosti proudění
- změna turbulentního na laminární proudění
- filtrace nečistot a strusky z taveniny

Tyto pochody je velmi problematické simulovat, dříve se použití filtrů kontrolovalo pomocí rentgenových paprsků. Simulace filtrů standartními metodami mohou trvat i několik měsíců. Použití Solid CV se simulace zkrátí řádově na hodiny. Tyto simulace také vyvozují důležité informace o konstrukci filtrů [3].



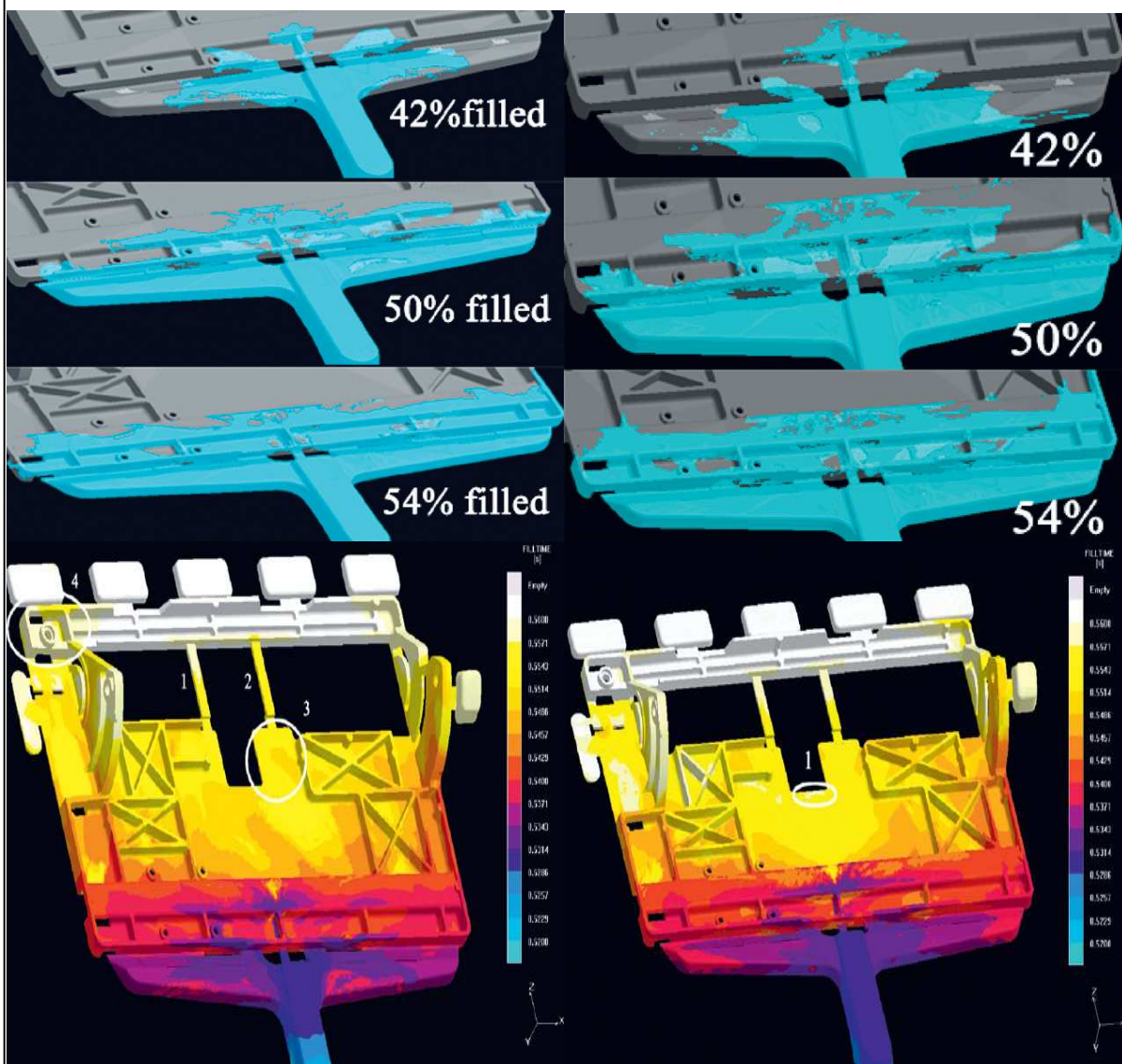
Obr. 5.1 Simulace reálných filtrů (3)

Nové modely filtrů - Již zde bylo zmíněno modelování filtrace při odlévání. Z důvodu nutnosti simulace filtrů bylo nutné plně popsat model filtru. Možnosti zavedení modelu je možné s nástupem výkonnějších výpočetních jednotek, které jsou schopny tento proces simulovat. Při simulaci sledujeme průběh rychlostních a tlakových funkcí před a za filtrem. Velkou roli zde hraje experiment, kdy pro různou porezitu filtrů měříme tyto veličiny pro určitý druh taveniny. Takto získaná data jsou statisticky zpracovány a na jejich základě je zvolen filtr s konkrétními parametry, který poslouží pro tvorbu 3D komplexního modelu. Síť takového modelu obsahuje až 20 milionů prvků, které popisují geometrii filtru. Následně je pro zvolenou taveninu a podmínky simulováno plnění formy. Starou metodu, která funguje na principu poklesu tlaku je výpočetní čas asi 100 hodin na osobním počítači. Simulace tohoto modelu na stejné výpočetní jednotce je několika násobně náročnější – získat data při 10-ti % naplnění formy trvá asi 200 hodin. S příchodem moderních výkonných počítačů se bude tento čas neustále zkracovat a bude docházet k zavádění čím dál komplexnějších modelů [10].



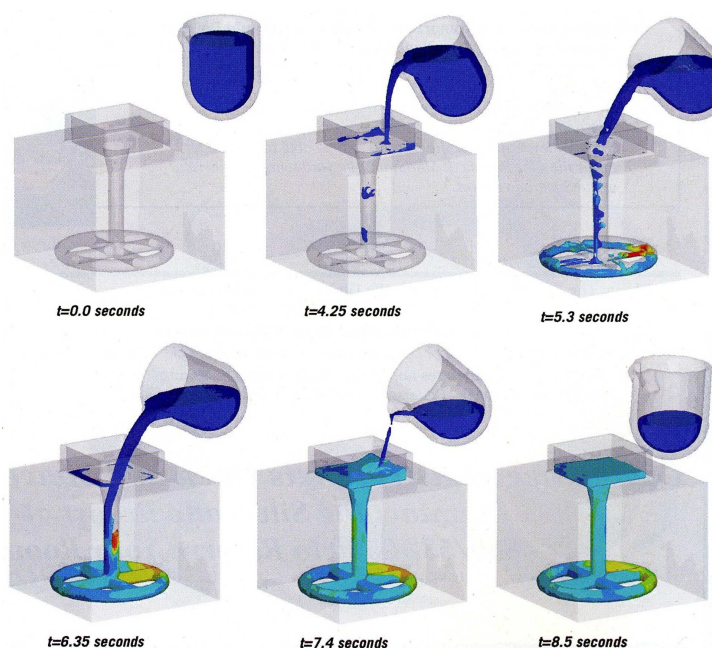
Obr. 5.2 Model filtru (10)

Parashot - Program MAGMAsoft umožňuje při tlakovém lití simulovat nestejnoměrný pohyb pístu – parashot. Tahle technologie umožňuje příznivě ovlivnit plnění formy a předcházet tak tvorbě vad, jako jsou závaly a nedolití. Skutečnost že známe možnosti využití parashotu nám umožní také optimalizovat vtokovou soustavu [9].

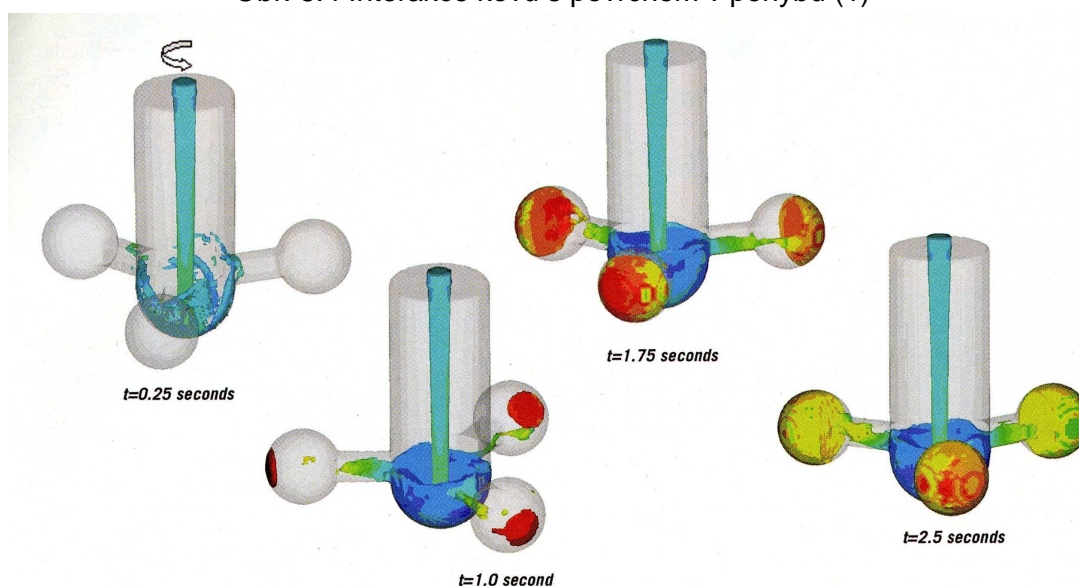


Obr. 5.3 Simulace Parashotu (9)

Interakce kovu s pohybujícím se povrchem - Další inovace v simulacích je zohlednění pohybujících se částí ve styku s taveninou. Dříve se při simulaci pouze definovalo místo a parametry vtoku taveniny (rychlost, počáteční teplota, atd.), nyní lze simulovat tepelné pochody, které probíhají v odlévacím kelímku. Vlastnosti taveniny se stykem s pohybujícími částmi slévárenského zařízení mění. Tato metoda se nazývá GMO (General Moving Objects). Tato metoda nachází uplatnění také v mnoha používaných technologiích, jako je např. odstředivé lití. Vlivem odstředivého účinku na taveninu dochází k vírům a turbulentnímu proudění, což má vliv na množství vad v odlitku. Podstatnými parametry jsou rychlost otáčení formy a rychlost plnění formy. Forma většinou rotuje během celého procesu tuhnutí, což je také nutno zohlednit při simulaci. Jak je vidno, pro popsání odstředivého lití je třeba zavádět velmi složité modely, aby byly zohledněny všechny zásadní parametry, které ovlivňují proces [1].

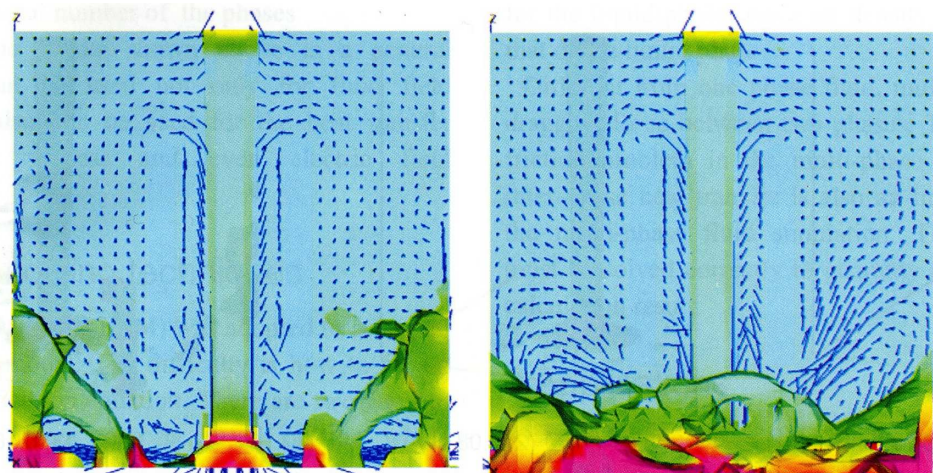


Obr. 5.4 Interakce kovu s povrchem v pohybu (1)



Obr. 5.5 Odstředivé lití (1)

Simulace více fázových soustav - Dalším zlepšením popisu procesu odlévání je simulace více fázových soustav. Tavenina s sebou do formy strhává vzduch a nečistoty, což se může projevit na množství vad v budoucím odlitku. Vtékající tavenina také může ovlivnit vzduch a plyny, které se nacházejí v době odlévání ve formě. Plyny začínají ve formě proudit, odcházejí výfuky a jsou strhávány proudem taveniny. Následně v tuhnoucí tavenině nahromaděný vzduch a plyny tvoří bubliny, které nemohou uniknout a tím se utvářejí budoucí vady odlitku [6].



(5) 0.26 s

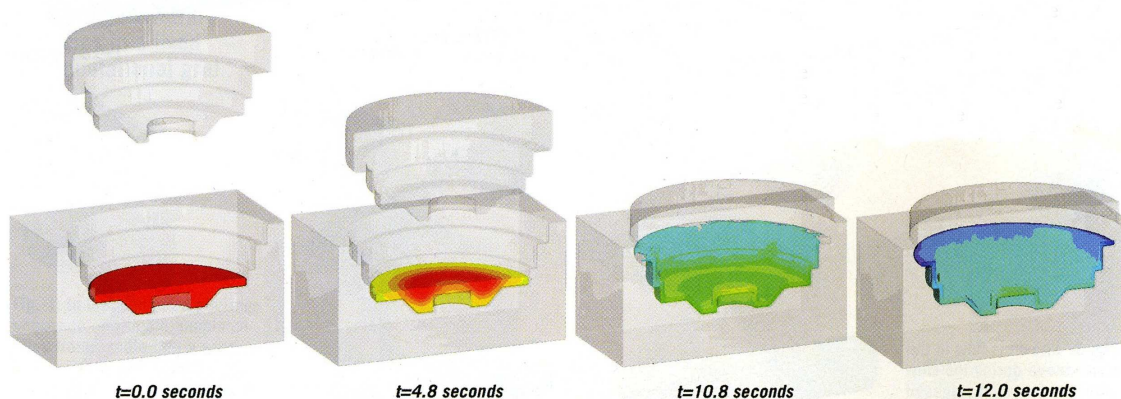
(6) 0.47 s

Obr. 5.6 Simulace více fázových soustav (6)

5.3 Simulace nových technologických procesů

Se zaváděním nových technologií jde ruku v ruce i jejich numerická simulace a často se také hraje velkou roli před zavedením technologie do praxe.

Squeeze casting – lití s krystalizací pod tlakem je progresivní metoda, která umožňuje odlévat tenké skořepiny s tloušťkou stěny 5mm z neželezných kovů. Tato metoda vykazuje velmi malé množství odpadu. Podstatou metody je dvoudílná forma, která je umístěna na lisu. Spodní díl je nehybný a obsahuje tekutý kov, horní, pohyblivá část formy sjíždí směrem dolů, mezera mezi horní a dolní polovinou formy vymezuje hotový odlitek. Takto vyrobené odlitky vykazují velmi dobré mechanické vlastnosti. Jelikož se jedná o metodu lití za zvýšeného tlaku je i zde možno simulovat nerovnoměrný pohyb horní poloviny formy a tak řízením pístu dosáhnout větší kvality odlitků [1].



Obr. 5.7 Squeeze casting (1)

Simulace mikrostruktury - Simulace také umožňuje sledovat velikost a orientaci zrn v odlitku. Mikrostruktura má velký vliv na mechanické vlastnosti, proto je velká snaha věnována řízení procesu tvorby a růstu zárodků (nukleace a krystalizace). U velmi namáhaných součástí, jako jsou lopatky turbín, je snaha, aby zrna byla orientována po směru lopatky, popřípadě se jednalo o monokrystal. Tím se omezí tvorba únavových trhlin, které obvykle vznikají na hranici zrn, které působí jako vrub. Řízení procesu krystalizace je složitý problém a spočívá v cíleném ovládní odvodu tepla ze součástí a tím vznikající zrna rostou v požadovaném směru [1].



Obr. 5.8 Simulace mikrostruktury (1)

Simulace vstřelování jader - Simulace se nedotýká pouze samotného odlévání, ale i technologických operací okolo odlévání. Jedná se např. o simulaci vstřelování jader a jejich vytvrzování. Tento proces není ještě zcela dobře popsán, proto experimenty, složitá měření a simulace nalézají odpovědi na otázky, co se při vstřelování jader ve skutečnosti děje. Konstrukce vstřelovacích forem pro jádra – jaderníků je také složitá a náročná na technologii výroby. Simulace tedy umožní navrhovat levnější a účelnější jaderníky, dokáže odhalit místa s nedokonalou zabíhavostí a vznik vad v důsledku strhávání vzduchu do formy. Také zde přichází v úvahu řízení procesu pomocí změny tlaku a rychlosti vstřelování jader.

Simulace vstřelování jader umožňuje:

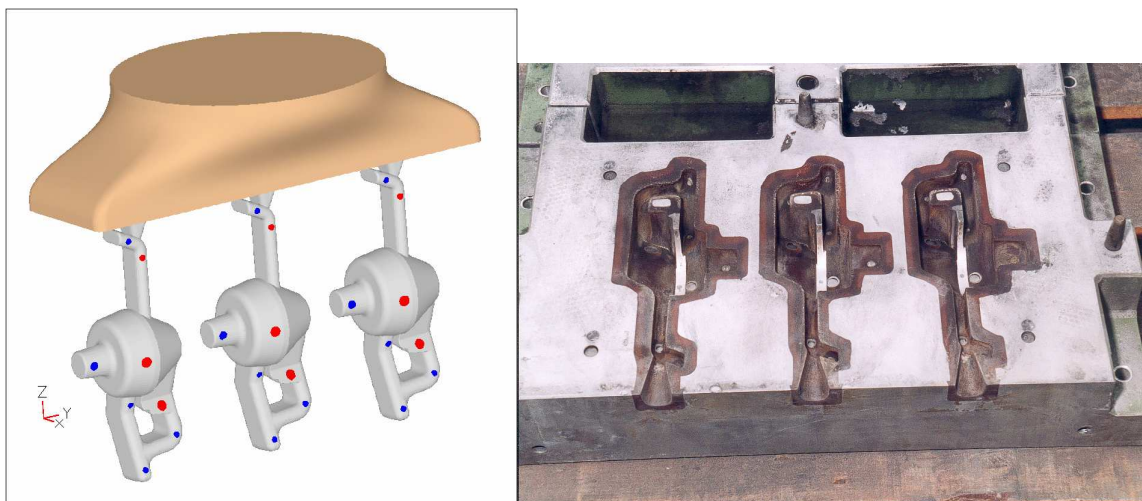
- sledování tlakových a rychlostních polí při vstřelování
- sledování postupu a spojování front proudící směsi
- predikci vad a kritických míst jádra

- určení charakteru průchodu plynu vytvrzovaným jádrem
- určení míst s nedokonalým vytvrzením
- optimální rozmístění odvzdušňovacích sítěk

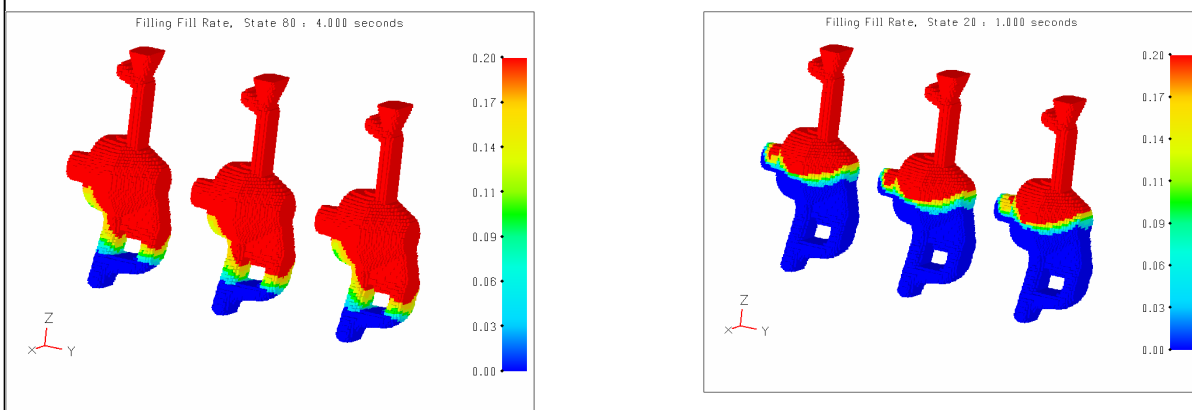
Model pro simulaci vstřelování jader je nesmírně složitý a stále dochází k jeho zdokonalování. Model využívá rovnic nenewtonovského proudění. Parametry, které popisují směsi a vstupují do výpočtu jsou náročné na způsoby měření a patří mezi ně:

- hustota směsi
- viskozita při změně smykových rychlostí
- faktor zhutnění v závislosti na smykových rychlostech a viskozitě
- velikost středního zrna směsi

U profukování jádra plynem je model ještě složitější, uvažují se rovnice proudění, prodyšnost vstřelované směsi, a vliv difuze na prostup směsí.

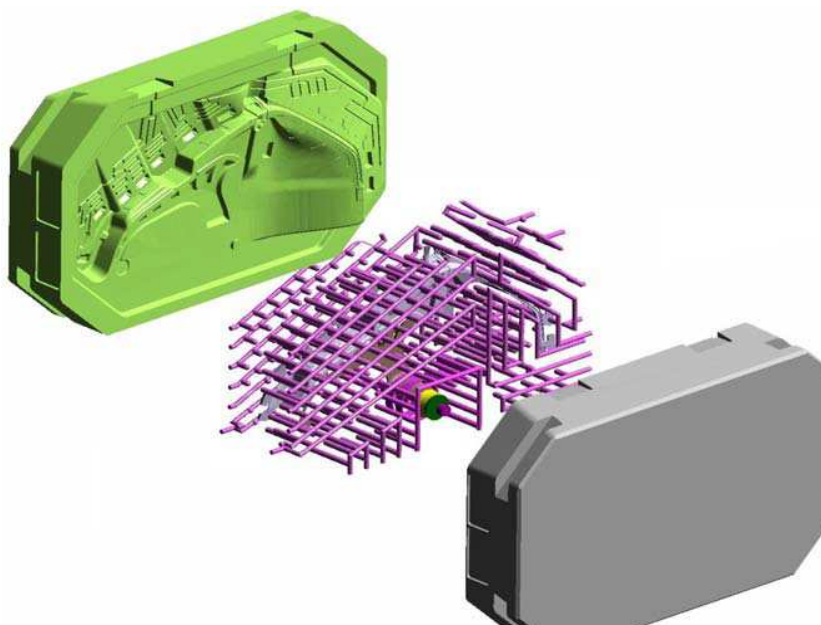


Obr. 5.9 Forma pro vstřelování jader



Obr. 5.10 Simulace vstřelování jader

Simulace tepelného a mechanického zatížení formy - Simulace může také pomoci při návrhu konstrukce formy pro zvýšení její životnosti. Formy pro přesné lítí, zvláště lehkých slitin jsou náročné na výrobu a také je nutno dodržet jistá technologická hlediska. Mezi takto vyráběné díly patří např. části karosérií pro automobilový průmysl. Tyto odlitky se většinou vyrábějí ve velkých sériích a trvalá forma je vystavena velkému mechanickému a tepelnému zatížení. Tuhnoucí odlitek, zvláště štíhlých tvarů, má snahu se deformovat a tím působit na formu. Forma je také namáhána přenosem tepla a v kombinaci s mechanickým namáháním může dojít k rychlému opotřebování formy a jejímu znehodnocení. Proto jsou formy navrhovány tak, aby byl odvod tepla z formy řízen, např. chlazením vodou nebo olejem proudícím v kanálcích uvnitř formy. Pro formy jsou voleny materiály, které dobře odolávají tepelné únavě. Použitím simulace se dají tyto procesy popsat a na základě těchto výsledků navrhnout optimální řešení kvalitní formy [4].



Obr. 5.11 Model formy (4)

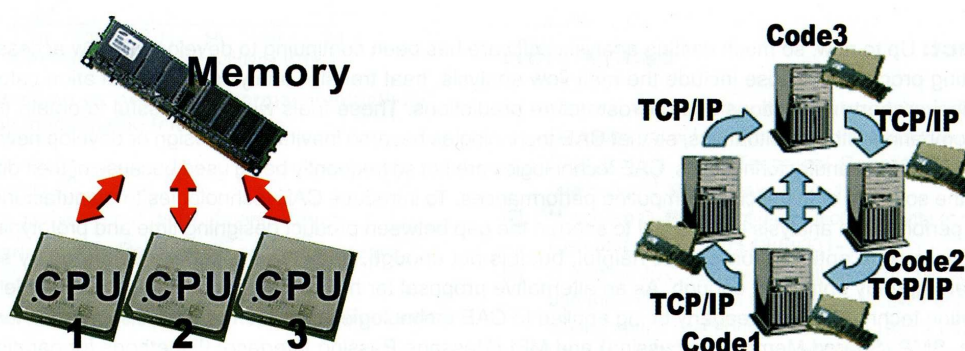
5.4 Hardware a software

Vývoj numerických simulací je také samozřejmě dán vývojem výpočetních jednotek. V dnešní době je tvorba 3D modelu možná na osobních počítačích, což samozřejmě snižuje náklady a přináší mnoho pozitivního. Také výkon výpočetních jednotek se neustále zvětšuje, což umožňuje na jednu stranu snižovat časy potřebné pro simulaci a na stranu druhou zadávat počítačům čím dál složitější a přesnější výpočty. Velká pozornost je také dnes věnována rozdělení simulace mezi více výpočetních jednotek. Existuje několik základních způsobů paralelního výpočtu:

- SMP (Shared Memory Procesing)
- MPI (Message Pasing Interface)
- DMP (Distributed memory parallel)

Metoda SPM sdružuje pomocí sběrnice několik výpočetních procesorů, které zpravidla mají společné úložiště dat a paměť. Tímto způsobem lze paralelně počítat několik problémů, což zrychlí výpočet. Tato metoda však příliš nerozšiřuje možnosti jednotlivých procesorů, ale přesto je velmi používaná pro simulace

Druhá metoda zakládá na síťovém propojení (ať už lokální síť, nebo pomocí internetu) všech výpočetních komponentů. Takle metoda tvoří podstatu ztv. superpočítačů. Je náročnější na paměťové požadavky, protože transfer dat do ostatních výpočetních jednotek může být neefektivní, navíc je nutno složitější hardwarové a softwarové zařízení [7].



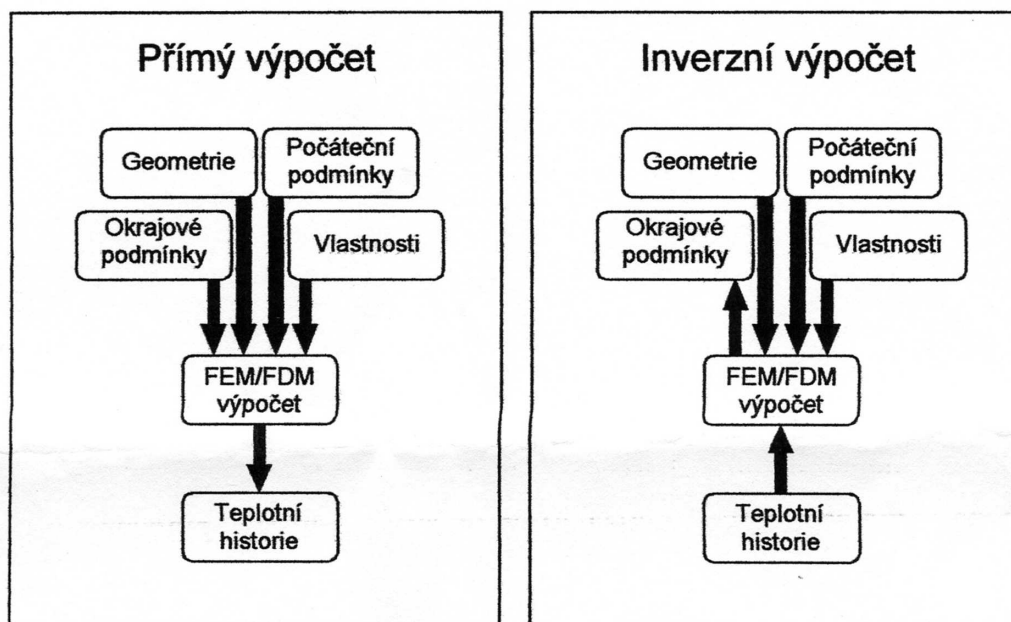
Obr. 5.12 Schéma propojení výpočetních jednotek (7)

5.5 Zpřesňování vstupních dat

Dalším způsobem, jak udělat simulaci více kvalitní je neustálé zjišťování nových termo-fyzikálních dat. Tato data mají významný vliv jako počáteční podmínky a konstanty celého výpočtu. Jedná se například o:

- konstanty přenosu tepla (koeficient přestupu tepla, emisivita,...)
- tepelná vodivost, měrná tepelná kapacita, hustoty materiálů, viskozita
- teploty skupenských a fázových přeměn
- termo-mechanická data (modul pružnosti, mez kluzu, zpevnění)
- veškeré vlastnosti forem a formovacích materiálů

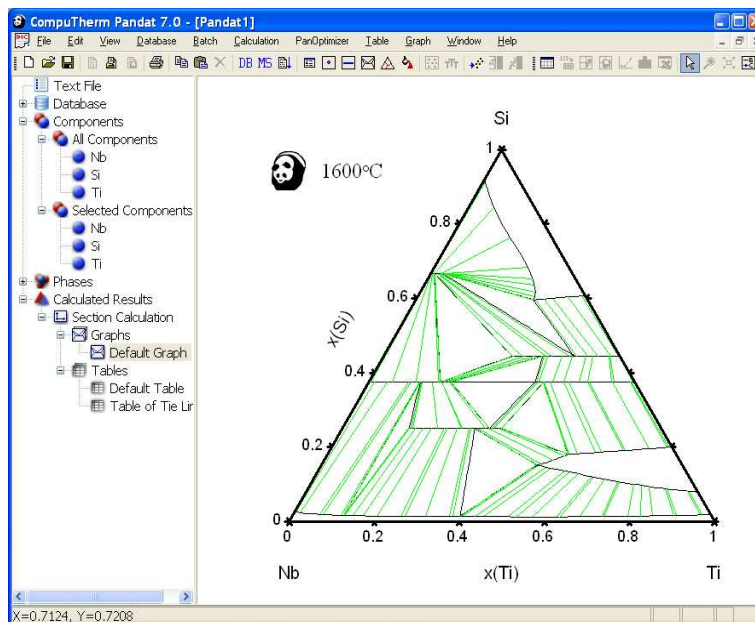
Inverzní simulace - Pro zjištění okrajových podmínek můžeme použít inverzní simulaci. Jedná se v podstatě o obrácený proces simulace. Při klasické simulaci známe pro daný materiál jeho materiálové charakteristiky, definici počátečních a okrajových podmínek a geometrie odlitku získáváme výsledek simulace – charakteristiku přenosu tepla ve formě teplotních polí na odlitku. Při inverzní simulaci musíme znát počáteční podmínky, geometrii a experimentálně zjištěná data průběhu teplot během odlévání a tuhnutí odlitku. Výsledkem poté jsou buď vypočtené okrajové podmínky, nebo materiálové charakteristiky – koeficienty přestupu a prostupu tepla a emisivita. Nicméně pro výpočet okrajových podmínek je nutné znát jejich odhad, který vstupuje do výpočtu.



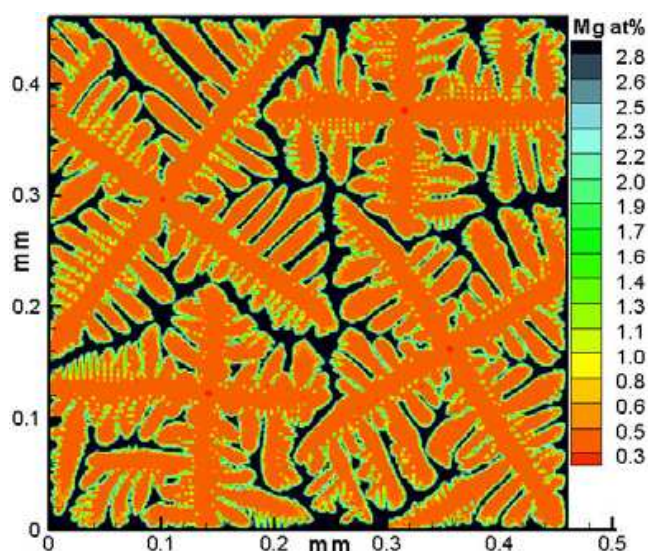
Obr. 5.13 Inverzní modelování

Termodynamické databáze - Pro zjištění vstupních dat, které charakterizují materiál se dnes užívá termodynamických databází. jedná se např. o databázi COMPUTHERM. Do databáze zadáme složení slitiny, kterou je potřeba simulovat a program sám vypočítá potřebná data. Databáze pracuje na bázi výpočtů Gibbsovy energie slitiny. Uživatel může v databázi jednotlivé hodnoty volně modifikovat. Tyto

databáze jsou schopny konstruovat fázové diagramy jednotlivých slitin, a s tím související teploty fázových přeměn a koncentrace složek. Tyto data v souvislosti s rychlostí tuhnutí taveniny a chladnutí odlitku umožňují předpovídat budoucí mikrostrukturu v odlitku – tvorbu dendritických fází, orientace zrn, morfologie grafitu apod. [11].



Obr. 5.14 Termodynamická databáze (11)



Obr. 5.15 Predikce mikrostruktury (11)

6 ZÁVĚR

Tato práce měla za úkol mapovat nové trendy v možnostech numerických simulací. Jak je vidno numerická simulace si ve slévárenství vydobývá své místo, stává se plnohodnotným prvkem při návrhu a realizaci efektivních výrobních postupů.

Nárůst výkonu počítačů umožňuje provádět složitější simulace, které se zahrnují stále více aspektů reálného slévárenského procesu. Postup vývoje výrobku je neustále se opakující iterační proces, který vede k neustálým inovacím a zvyšování kvality výrobků. V každé části tohoto procesu se využívá počítačové podpory, takže simulace ve slévárenství navazují na další oblasti vývoje výrobku, ať už se jedná o konstrukční, nebo modelovací software, až po pevnostní výpočty ve strojírenství.

Simulace se nevztahují pouze na vlastní proces lití, ale i na problematiku forem, formovacích směsí a jader. Simulace také umožňuje získávat přesnější fyzikální data používaných materiálů.

Velkou úlohu hraje simulace také při návrhu nových technologií a postupů, Novou technologii lze simulovat a tím odladit spoustu nedostatků již před prvotním experimentem, což šetří čas a peníze a toto je v dnešní době vítaná skutečnost.

Při simulacích je důležité nejen užít správných postupů a výchozích parametrů, ale i dané výsledky řádně vyhodnotit a vyvodit z nich pro řešený problém patřičné důsledky. Ke kvalitnímu využití numerických simulací v průmyslové praxi, je tedy třeba ovládat teoretické disciplíny slévárenství a také využívat vlastních zkušeností získané při řešení předchozích problémů. Jen tak bude simulační software efektivně využívaný nástroj v rukou odborníka a bude sloužit pro zvyšování kvality odlitků a snižování jejich ceny.

Do budoucna se trendy v numerické simulaci tedy budou snažit plnit požadavky kladené technickou praxí. Se zaměřením na simulaci nových technologií, zpřesňování daných výrobních postupů a zahrnování čím dál více vlivů. Numerická simulace nám bude pomáhat porozumět procesům, které probíhají v tuhoucím materiálu, interakci mezi formou a odlitkem s následným vlivem na jakost odlitku. Numerická simulace také zasahuje do oblasti materiálových věd, kde výrazně napomáhá zjišťování vlastností materiálů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. BARKHUDAROV, M., GENGSHENG, W., Modeling Casting on the Move, *Modern Casting*, August 2006, Vol. 96, No. 08, s. 28-37, ISSN-0026-7562.
2. BONOLLO, F., and ODORIZZI, S., *Numerical Simulation of Foundry Processes*, 1st ed., Padova: S.G.E., 2001, 264 s., ISBN 88-86281-63-3.
3. Casting simulation of real filters, *Foundry Trade Journal*, July-August 2009, s.169.
4. EGNER-WALTER, A., OLIVE, S., Using Stress Simulation to tackle Distorsion and Cracking in Castings, In *proceedings – 67th world foundry congress*, 5-7 June 2006, Harrogate International Centre, Harrogate, UK, s.51.
5. HERMAN, A., et al., *Počítačové simulace ve slévárenství*, 1. Vydání, Praha, Vydavatelství ČVUT, 2000, 62 s., 62 obrázků, 16 příloh, ISBN 80-01-02220-X.
6. CHEN, L. – LIU, R. – BERCKERMANN, C., Numerical simulation of complex multiphase fluid of casting process and its applications, *China Foundry*, May 2006, Vol. 3, No. 2, s. 83-86, ISSN-1672-6421.
7. CHO, S, H. – CHOI, J, K., Development of high performance casting analysis software by coupled parallel computation, *China Foundry*, August 2007, Vol 4, No 3, s. 215-219, ISSN-1672-6421.
8. JIYUAN TU, GUAN HENG YEOH, CHAOQUN LIU, *Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach*, 1 st ed., Elsevier, 2008, 459 s., ISBN 978-0-7506-8563-4.
9. KOTAS P., HATTEL, J., H., Petr VRÁBEL, P., Optimalizace plnění tlakově litého odlitku v programu MAGMASoft®, *Slévárenství*, Svaz sléváren České republiky, červenec-srpen 2008, čís. 7 - 8, s. 366-368, ISSN 47 325.
10. MIDEA, A., OLIVIERIA, L., Modeling Filters in the Future, *Modern Casting*, September 2007, Vol. 97, No 09, s. 36-38, ISSN-0026_7562.
11. W. CAO, S.-L. CHEN, F. ZHANG, K. WU, Y. YANG, Y. A. CHANG, R. SCHMID-FETZER, W. A. OATES, PANDAT Software with PanEngine, PanOptimizer and PanPrecipitation for Multi-Component Phase Diagram Calculation and Materials Property Simulation, *Calphad*, 2009, 50 s., 33(2): 328-342.

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Popis
$v_x, v_y, v_z,$	složky rychlosti
σ	hustota
τ	čas
D	součinitel difúzního přenosu hmoty
F_m	hmotnostní síla
F_p	tlaková síla
F_t	třecí síla
F_s	setrvačná síla
dQ_τ	změna celkové vnitřní energie za čas τ
dQ_{difuze}	změna energie difuzí
dQ_{konvekce}	změna energie konvekci
$dQ_{\text{zářenn}}$	změna energie zářením
dQ_{zdroj}	změna energie vnitřních zdrojů
α	tepelná vodivost

